饲粮抗氧化剂对肌肉嫩度的影响及作用机制

徐少庭　徐晨晨　罗海玲*

（中国农业大学动物科技学院，动物营养学国家重点实验室，北京 100193）

摘　要：嫩度是肌肉品质重要的感官指标之一，决定肌肉的营养品质和食用品质。而在动物集约化生产过程中，必然产生的氧化应激会对肌肉品质产生巨大的不利影响，因此探索一种有效的措施改善氧化应激对肌肉嫩度的影响至关重要。结合国内外关于肉质嫩度的研究现状，本文主要对氧化应激、抗氧化剂对肌肉嫩度的影响及作用机制进行阐述，旨在为高效合理地利用抗氧化剂改善肌肉嫩度提供借鉴。

关键词：肉品质；嫩度；饲粮；抗氧化剂

中图分类号：S811

改革开放后我国畜牧业发展迅速，根据《中国统计年鉴》（2016），2015 年度全国肉类产量达 8 625 万 t。随着世界各国经济发展水平的提高以及消费者消费理念的转变，消费者对肉类产品的要求不断提高，因此如何改善肉的嫩度也成为众多科研工作者长期研究的热点之一。嫩度是指采用刀具切割肌肉时的剪切力或人咀嚼熟肉时口腔对肉硬度的总体感受，反映肉的柔软程度和嚼碎程度等，是评定肉品质最重要的指标之一，也是稳定性最差、最易受干扰的肉品质指标[1-2]。通常采用感官评定或仪器评定的方法进行评价。在肉的生产、加工、储存、转运等过程中，因集约化生产、营养不良、长途运输、极端环境和冷冻储藏等因素引起的氧化应激增加了机体过氧化反应，使肌肉极易发生氧化变质，降低肌肉嫩度和色泽稳定性，缩短肉品货架期[3]，因此在饲粮中添加外源性抗氧化剂抑制肌肉的氧化，成为延长肉品的货架期、提高肉品质的有效方法。目前，有关饲粮抗氧化剂的研究多集中在对动物机体抗氧化性能、生长性能和肉品质指标等方面的影响，有关其对肌肉嫩度及其作用机制的研究报道相对较少。因此，揭示和总结抗氧化剂对肌肉嫩度的作用机制对合理高效利用抗氧化剂具有重要意义。

1　氧化应激对肌肉嫩度的影响

在动物生产中，由于受养殖条件、宰前环境、运输应激等各种因素的影响，会引起机体内的自由基浓度过高，导致动物发生氧化应激，对动物健康、生产性能及产品品质等造成不

收稿日期：2017-01-24
基金项目：国家肉羊产业技术体系（CARS-39）
作者简介：徐少庭（1994–），男，广东陆丰人，硕士研究生，从事反刍动物营养研究。E-mail：xushaoting@cau.edu.cn
*通信作者：罗海玲，教授，博士生导师，E-mail： luohailing@cau.edu.cn

利影响[4]。氧化应激可使肌肉发生氧化变质，表现为变色、变味，甚至形成有毒物质，保质期降低，营养物质和嫩度变差[5]。因为高水平的自由基致使肌肉感官品质和嫩度降低，引起蛋白质功能丧失并消耗肉中必需氨基酸（如苯丙氨酸和色氨酸），因此，了解肉中自由基活性很重要[6-8]。

在机体代谢反应期间消耗的小部分（2%~5%）氧被转化为活性氧形式的自由基[9]，通过与蛋白质、脂肪酸和核酸相互作用，在机体内稳态过程中发挥关键的调节作用。而过多的自由基在肌肉中易与生物膜结构中大量的不饱和脂肪酸作用，产生连锁反应并生成一系列脂质氧化产物，活性氧、活性氮以及脂质氧化产物等都可以诱导蛋白质或酶的氧化修饰，改变蛋白质结构与性质，致使酶活性发生改变，从而改变肌肉嫩度[10-11]。

杨培歌等[12]研究报道高温应激组（30 ℃）育肥猪的背最长肌嫩度极显著低于对照组（22 ℃）。闫雪等[13]研究发现，电击驱赶应激显著降低屠宰后东北民猪背最长肌嫩度，影响肉品质。动物活体状态下存在相对低的氧化应激和高的抗氧化能力；而宰后特别是在肌肉向肉转变过程中，存在高的氧化应激和相对低的抗氧化能力以逆转氧化反应[14]。这 2 种情况之间的差异使得氧化应激对肉品质量很重要。由于导致氧化应激的因素复杂多样，不同的氧化应激状态对动物肌肉嫩度产生不同程度的影响，因此，不同的抗氧化剂作用机制和效果也有所不同。

2 抗氧化剂对肌肉嫩度的作用机制

肌肉嫩度形成的基础是肌纤维、结缔组织与肌内脂肪的含量、理化性质及其内部的生物化学状态，所有能影响肌肉组织结构和内部状态的因素都能间接影响嫩度，包括动物的品种与基因、性别、年龄、饲料营养、饲养管理、屠宰加工、宰后成熟等多方面因素。肌肉嫩度变化的主要原因是肌间线蛋白、肌联蛋白和伴肌动蛋白等肌原纤维蛋白的降解，而动物体内蛋白质的降解涉及多个蛋白酶系统，其中，以钙蛋白酶–钙蛋白酶抑制蛋白系统最为主要[15-16]。饲粮中抗氧化剂通过提高动物机体和宰后肌肉的抗氧化能力，抑制活性氧、活性氮等自由基对肌肉中蛋白质、酶和脂肪的氧化，保护肌肉中蛋白质与酶结构和功能的完整性，从而达到改善肌肉嫩度的作用[17]。

潘君慧[18]进行了体外诱导肌原纤维蛋白氧化的试验，结果表明，贮藏过程中的氧化作用提高了肌原纤维蛋白的羰基含量、交联程度和粒径，并降低了总硫基含量，其中肌球蛋白最易发生氧化交联，而在肉品贮藏过程中通过添加复合抗氧化剂等措施可阻断蛋白质氧化途径改善肌肉嫩度。李青萍等[19]研究发现，饲粮中添加维生素 E 显著改善了猪肉的嫩度，同时，肌纤维的超微结构分析表明，添加维生素 E 极显著提高了猪肉的肌节长度、 I 带长度

以及降低了肌原纤维直径。而肌节长度、Ⅰ带长度和肌原纤维直径都与肌肉嫩度密切相关。张玉伟等[20]研究指出，甘草提取物能够抑制自由基对钙蛋白酶的攻击，提高了钙蛋白酶的活性及促进了肌肉蛋白的降解。这表明抗氧化剂通过提高成熟过程中钙蛋白酶活性对肌肉产生影响，进而改变肌肉嫩度。

3　饲粮添加抗氧化剂对肌肉嫩度的作用效果

在饲粮或肌肉中添加外源性抗氧化剂可以直接或间接清除机体或肌肉中的自由基，提高动物机体或肌肉的抗氧化性能。外源性抗氧化类物质种类繁多，包括天然抗氧化剂如维生素E、维生素C、α–硫辛酸等，植物提取物如异黄酮、茶多酚、番茄红素、香料提取物等及其他抗氧化剂。

3.1　维生素

大量研究表明，在动物饲粮中添加某些维生素可以提高动物机体和肌肉的抗氧化性能。维生素 E 是生育酚类化合物，具有抗氧化、促生长和提高繁殖力等多种生物学功能。维生素 E 作为类脂膜的重要组分，可以通过清除自由基来保护细胞膜的结构与功能，进而防止细胞质外流，增加肌肉嫩度[21]。维生素 C 能够通过提供电子来清除自由基或恢复维生素 E 的抗氧化功能，进而与维生素 E 表现出协同作用。但很多研究发现，当有过渡金属离子存在或高剂量添加时，维生素 C 和维生素 E 容易起到促氧化作用，由此可见，在一定作用条件下，抗氧化剂也可能起到促氧化的作用。

王显慧[22]研究表明，添加不同剂量的维生素 E 和维生素 C 对不同部位肌肉嫩度的影响程度不同，维生素 C 添加水平为 150 和 300 mg/kg 时显著改善了腿肌的嫩度，但对胸肌嫩度没有显著影响，而饲粮维生素 E 添加水平为 100 mg/kg 时则显著改善了胸肌嫩度；同时，该试验还证明了饲粮中单独添加维生素 C 或维生素 E 都能够显著提高肉鸡机体和冷藏过程中肌肉的抗氧化性能。有研究指出，维生素 E 在动物组织中蓄积到一定浓度才能对肉质发挥作用，而动物组织中维生素 E 浓度受饲粮中维生素 E 添加水平和添加时间的影响[23-24]。这表明，添加不同剂量的维生素 E 和维生素 C 对动物不同部位肌肉品质的作用可能存在差异，而且维生素 E 和维生素 C 添加量过高或过低可能无法起到改善某些肉品质指标的作用。

3.2　植物提取物

已有研究发现，很多植物及其提取物都有良好的抗氧化功能，这主要与其中的酚、醛含量有关，如番茄红素、茶多酚、金银花提取物、白藜芦醇、番石榴粉、桑叶、牛至等。但目前对大部分产品的研究还多集中在对动物机体抗氧化性能和生长性能等方面的影响，有关其对肌肉嫩度的影响及其作用机理还鲜有报道。番茄红素是一类主要存在于番茄、番石榴等成

熟的红色植物果实中的类胡萝卜素，具有很强的抗氧化性能[25]。蒋红琴[26]研究表明，番茄红素在体内和体外都具有良好的抗氧化功能，饲粮中添加番茄红素可以提高羊肉嫩度，但未达显著水平。茶多酚是一种存在于茶叶中的生物活性物质，其主要成分包括儿茶素类、黄酮醇类和花青素类等[27]。据农业部公告第 2 045 号，茶多酚被列为允许在畜禽饲粮中使用的抗氧化剂。晁娅梅等[28]研究了茶多酚对育肥猪抗氧化性能和肉品质的影响，结果表明，饲粮中添加 0.04%的茶多酚对嫩度没有显著影响，但添加茶多酚能显著提高育肥猪的抗氧化性能。姚波等[29]研究发现，饲粮中添加 0.009%和 0.013%的茶多酚能显著改善猪肉的抗氧化性能；此外饲喂茶多酚能够改善猪肉的嫩度，但未达显著水平。饲粮中添加金银花提取物、白藜芦醇、番石榴粉和桑叶等成分都能够显著改善肌肉的嫩度[30-33]。但有研究发现牛至精油对羊肉或猪肉嫩度无显著影响[34-35]。不同试验结果的差异可能与抗氧化剂种类、添加剂量、试验期和动物等因素有关。

3.3　其他抗氧化剂

很多单一的抗氧化剂或含有抗氧化类物质的产品在体内或体外试验中被证明具有良好的抗氧化功能，如 α–硫辛酸、微生物添加剂和二氢吡啶等，但不少研究发现，这些产品对肌肉嫩度的影响程度差异很大。郭志有[36]研究证明，α–硫辛酸能显著改善肉鸡的抗氧化性能和肌肉嫩度等。张天阳等[37]测定了饲喂乳酸菌液对猪肉品质和抗氧化性能的影响，结果表明，饲喂乳酸菌液可以显著改善猪肉的嫩度和抗氧化性能。边连全等[38]研究发现，饲粮中添加一定量的二氢吡啶可以提高猪肉的嫩度，但未达显著水平。而李晶等[39]研究表明，饲喂米糠显著降低了猪肉的嫩度，在此基础上补充含有谷胱甘肽、二氢吡啶和 α–硫酸锌的添加剂可以显著提高猪肉的嫩度。不同抗氧化剂都可能同时具有多种生物学功能，对肌肉的作用机制可能存在差异，因此，不同抗氧化剂对肌肉嫩度的影响还有待于进一步研究。

4　小　结

饲喂型抗氧化剂的抗氧化功能主要表现为通过直接或间接清除或减少动物机体内过多的自由基，进而维持机体内自由基含量的动态平衡和改善机体组织与肌肉的抗氧化性能，抑制肌肉中脂质的氧化降解、蛋白质的氧化变性和酶活性的下降，从而改善肌肉嫩度。抗氧化剂作为饲料添加剂在畜禽生产上的应用研究吸引了很多研究者的关注，这方面的文献报道也非常多，但是大多数研究都集中在探索新的抗氧化剂以及抗氧化剂对动物健康、生产性能以及综合肉品质等方面的影响上，而有关抗氧化剂对肌肉嫩度的影响及其作用机理的研究缺乏系统性。未来，在保证动物健康安全的前提下，需要深入探索抗氧化剂对肌肉嫩度的作用机制，为合理有效使用抗氧化剂、减少应激对肉品质造成的不利影响提供理论依据。

参考文献：

[1] 张伟力.猪肉质地与风味测定[J].养猪,2002(4):33–35.

[2] 黄鸿兵,徐幸莲.肉的色泽与嫩度[J].肉类研究,2003(3):12–14.

[3] ZHONG R Z,ZHOU D W,TAN C Y,et al.Effect of tea catechins on regulation of antioxidant enzyme expression in H_2O_2-induced skeletal muscle cells of goat *in vitro*[J].Journal of agricultural and food chemistry,2011,59(20):11338–11343.

[4] 蒋红琴,罗海玲,曲扬华.番茄红素的生物学特性及其在动物生产中的应用前景[C]//2014年全国养羊生产与学术研讨会论文集.聊城:中国畜牧兽医学会养羊学分会,2014:29–31.

[5] CONTINI C,ÁLVAREZ R,O'SULLIVANA M,et al.Effect of an active packaging with citrus extract on lipid oxidation and sensory quality of cooked turkey meat[J].Meat Science,2014,96(3):1171–1176.

[6] EL-AAL H A H M A.Lipid peroxidation end-products as a key of oxidative stress:effect of antioxidant on their production and transfer of free radicals[M]//CATALA A.Lipid Peroxidation.[S.l.]:INTECH Open Access Publisher,2012.

[7] LUND M N,HEINONEN M,BARON C P,et al.Protein oxidation in muscle foods:a review[J].Molecular Nutrition & Food Research,2011,55(1):83–95.

[8] GANHÃO R,MORCUENDE D,ESTÉVEZ M.Tryptophan depletion and formation of α-aminoadipic and γ-glutamic semialdehydes in porcine burger patties with added phenolic-rich fruit extracts[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2010,58(6):3541–3548.

[9] MOYLAN S,BERK M,DEAN O M,et al.Oxidative & nitrosative stress in depression:why so much stress?[J].Neuroscience & Biobehavioral Reviews,2014,45:46–62.

[10] FAYEMI P O,MUCHENJE V.Maternal slaughter at abattoirs:history,causes,cases and the meat industry[J].Springer Plus,2013,2(1):125.

[11] HUFF-LONERGAN E,LONERGAN S M.Mechanisms of water-holding capacity of meat:The role of postmortem biochemical and structural changes[J].Meat Science,2005,71(1):194–204.

[12] 杨培歌,冯跃进,郝月,等.持续高温应激对肥育猪生产性能、胴体性状、背最长肌营养物质含量及肌纤维特性的影响[J].动物营养学报,2014,26(9):2503–2512.

[13] 闫雪,白秀梅,胡晓东,等.电击驱赶应激对皮特兰猪和东北民猪肉品质以及生理生化指标的影响[J].畜牧与兽医,2015,47(10):66–69.

[14] WARNER R D,DUNSHEA F R,PONNAMPALAM E N,et al.Effects of nitric oxide and oxidation *in vivo* and postmortem on meat tenderness[J].Meat Science,2005,71(1):205–217.

[15] 黄明,罗欣.内源蛋白酶在肉嫩化中的作用(综述)[J].肉类研究,1999(2):9–11.

[16] 尹靖东,李德发.猪肉质形成的分子机制与营养调控[J].动物营养学报,2014,26(10):2979–2985.

[17] 崔艳军.热应激和氧化应激对肥育猪骨骼肌代谢的影响及硫辛酸的调控作用[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2016:61–75.

[18] 潘君慧.冻藏方式、猪肉蛋白氧化及猪肉品质关系的研究[D].硕士学位论文.无锡:江南大学,2011:9–36.

[19] 李青萍,乔秀红,王向东.饲粮中添加维生素 E 对猪肉质的影响[J].中国畜牧杂志,2003,39(5):34–35.

[20] 张玉伟,罗海玲,刘昆,等.钙蛋白酶介导的甘草提取物降低肌肉滴水损失的蛋白降解机制[C]//中国畜牧兽医学会动物营养学分会第七届中国饲料营养学术研讨会论文集.郑州:中国畜牧兽医学会,2014.

[21] 葛素云.维生素 E 对羊肉品质的改善及其对脂蛋白酯酶活性的影响[D].硕士学位论文.北京:中国农业大学,2011:17–18.

[22] 王显慧.VC 和 VE 对肉鸡抗氧化性能和肉品氧化稳定性的影响[D].硕士学位论文.杨凌:西北农林科技大学,2010:23–42.

[23] 王显慧,刘福柱,牛竹叶,等.VE 对肉鸡抗氧化性能和肉品氧化稳定性的影响[J].西北农业学报,2011,20(2):1–7.

[24] MORRISSEY P A,BRANDON S,BUCKLEY D J,et al.Tissue content of α-tocopherol and oxidative stability of broilers receiving dietary α-tocopheryl acetate supplement for various periods pre-slaughter[J].British Poultry Science,1997,38(1):84–88.

[25] MANGELS A R,HOLDEN J M,BEECHER G R,et al.Carotenoid content of fruits and vegetables:an evaluation of analytic data[J].Journal of the American Dietetic Association,1993,93(3):284–296.

[26] 蒋红琴.番茄红素对巴美肉羊肉品质的影响及其抗氧化机理研究[D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2015:30–73.

[27] 张婷,陈宇光,罗佳捷.茶多酚在动物生产中的研究进展[J].饲料博览,2013(3):16–19.

[28] 晁娅梅,陈代文,余冰,等.茶多酚对育肥猪生长性能、抗氧化能力、胴体品质和肉品质的

影响[J].动物营养学报,2016,28(12):3996–4005.

[29] 姚波,屠幼英,王春花.茶多酚作为育肥猪天然肉质改良剂的应用研究[J].饲料工业,2015,36(20):12–14.

[30] 黄涛.金银花提取物对夏季高温条件下肉牛骨骼肌纤维形态和肌肉品质的影响[D].硕士学位论文.南昌:江西农业大学,2015:22–30.

[31] ZHANG C,LUO J Q,YU B,et al.Dietary resveratrol supplementation improves meat quality of finishing pigs through changing muscle fiber characteristics and antioxidative status[J].Meat Science,2015,102:15–21.

[32] VERMA A K,RAJKUMAR V,BANERJEE R,et al.Guava (*Psidium guajava* L.) Powder as an Antioxidant dietary fibre in sheep meat nuggets[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2013,26(6):886–895.

[33] 李伟玲.桑叶对肉羊生产性能、血液生化指标、免疫抗氧化功能和肉品质的影响[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2012:21–22.

[34] SIMITZIS P E,DELIGEORGIS S G,BIZELIS J A,et al.Effect of dietary oregano oil supplementation on lamb meat characteristics[J].Meat Science,2008,79(2):217–223.

[35] SIMITZIS P E,SYMEON G K,CHARISMIADOU M A,et al.The effects of dietary oregano oil supplementation on pig meat characteristics[J].Meat Science,2010,84(4):670–676.

[36] 郭志有.α–硫辛酸对肉鸡抗氧化的影响及其作用机制研究[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学，2014.

[37] 张天阳,徐海鹏,曾勇庆,等.饲喂不同剂量乳酸菌液对肥育猪肉质特性及抗氧化性的影响[J].养猪,2014(1):41–43.

[38] 边连全,袁丹,刘显军,等.二氢吡啶对育肥猪生长性能、肉品品质及肌肉组织抗氧化性能的影响[J].河南畜牧兽医:综合版,2009,30(5):5–7.

[39] 李晶,周勤飞,童晓莉,等.饲粮中添加米糠和抗氧化剂对肥育猪生产性能和肉品质的影响[J].粮食与饲料工业,2010(1):42–45.

Effects and Mechanisms of Dietary Antioxidants on Meat Tenderness

XU Shaoting XU Chenchen LUO Hailing*

(*State Key Laboratory of Animal Nutrition, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing* 100193, *China*)

Abstract: Tenderness is one of the important sensory indicators of muscle quality, and plays an important role in the nutritional and eating quality of meats. However, the inevitable oxidative stress could have a significant adverse effect on meat quality during intensive animal production. Thus, it is important to seek an effective measure to improve the effect of oxidative stress on meat tenderness. Based on the domestic and foreign research references, this paper mainly elaborated the effects of oxidative stress and antioxidants on the tenderness of meat and its action mechanism, which provided a reference for improving the tenderness by using antioxidants effectively and reasonably.

Key words: meat quality; tenderness; diet; antioxidants

---

*Corresponding author, professor, E-mail: luohailing@cau.edu.cn （责任编辑　田艳明）